

極寒地の基礎工

Foundations in Cold Regions

宋 光 燮*
Song, Kwang Sop

目 次

1. 序 言
2. 極寒地 基礎工의 種類
 - 2.1 分類方法
 - 2.2 自然凍結型(Passive Techniques)
 - 1) 自然對流型시설(Natural Convection Devices)
 - 2) Thermosyphon
 - 3) 斷熱工(Thermal Barrier, Insulation)
 - 4) 熱貯留시설(Heat Sink)
 - 5) 高架式 構造(Elevated Construction Modes)
 - 6) 地表面處理(Ground Surface Modification)
 - 7) 杭基礎(Piles)
 - 2.3 人工凍結型(Active Techniques)
 - 1) 強制換氣式 바닥基礎(Forced Ventilation Pad)
 - 2) 強制換氣式 Pile(Forced Ventilated Pile)
 - 3) 機械的凍結工法(Refrigeration)
 - 2.4 融解工法(Thawing Techniques)
 - 1) 蒸氣融解(Steam Thawing)
 - 2) 注水融解(Warm and Cold Water Thawing)
 - 3) 電氣融解(Electric Thawing)
 - 4) 太陽熱融解(Solar Thawing)
3. 極寒地 基礎工의 選擇
 - 3.1 極寒地 基礎工 選擇에 考慮할 諸要素
 - 1) 設計壽命(Design Life)
 - 2) 長期大荷重(High Long-term Loads)
 - 3) 短期荷重(High Short-term Uplift Loads)
 - 4) 建築物의 暖房性
 - 5) 建築物의 美觀上 要件
 - 6) 沈下에 對한 許容度
 - 7) 地盤의 穿孔性
 - 8) 바닥 龜裂에 對한 許容度
 - 9) 動力의 供給可能性
 - 10) 維持補修의 必要性
 - 11) 建物使用者(賃貸與否)
 - 12) 周邊으로부터의 出入通行
 - 3.2 基礎工 選擇의 決定
4. 맺는말

1. 序 言

우리나라의 海外建設 進出樣狀은 '88 서울올림픽 以後 北方政策의 急速한 推進이 있기까지는 그 活動의 範圍가 主로 中東地域에 置重되어 全體 海外建設 受注高의 90%를 上廻하는 形便이었다. 그러나 東歐圈 諸國 및 소련과의 國交가 열리면서 特히 시베리아 地域의 未開發 資源으로 눈을 돌리게 되고 여러가지 形態의 資源開發

Project가 活潑히 論議 또는 推進되고 있는 時點에 이르렀다.

그러나 이들 大部分의 Project는 前人未踏의 凍土에 걸쳐있으며 개발에 앞서 道路, 鐵道 등의 交通手段의 건설과 現地의 住居에 따르는 便宜施設이 先行되어야 함은 必然的 條件이다. 따라서 本稿는 極寒地에서 現在까지 採用되어온 여러가지 基礎工法의 現況(state of practice)과 概要를 種類別로 分類하여 比較記述하고 現場條件에

* 土木技術士(港灣 및 海岸) 建設技術教育院 土木科 教授

따라 그 基礎工을 選擇하는 決定技法을 考察하므
로서 앞으로 極寒地에 進出하여 遭遇하게 될
基礎工의 問題에 對한 斯界의 關心을 提高하는데
一助가 되고저 하는 바이다.

永久凍土(Permafrost)란 最少 連續二個의
冬季와 그 中間의 夏季에 걸쳐 0℃ 以下의 溫度
를 維持하는 地盤을 말하며 그 橫方向 分布의
連續性에 따라 連續帶(Continuous), 不連續帶
(Discontinuous) 및 點在帶(Sporadic)로 區分된
다. 北半球의 永久凍土의 分布狀況은 그림 1에서
보는 바와 같다.

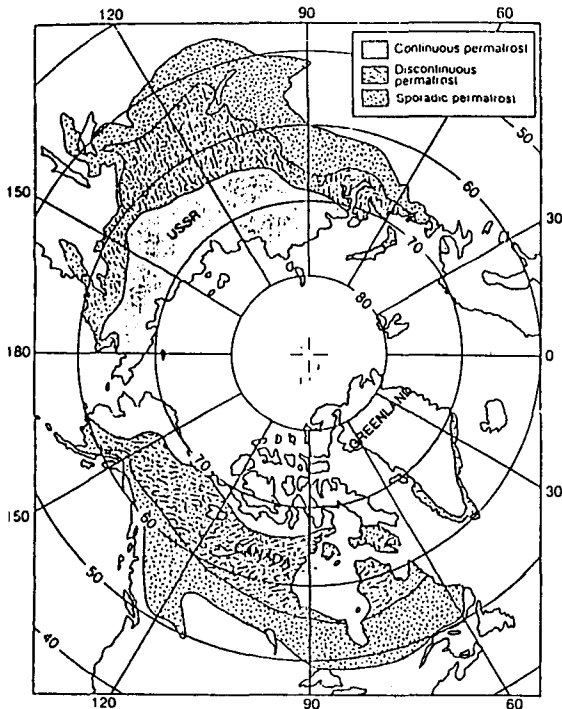


그림 1 北半球의 永久凍土 分布 [1]

極寒地에서는 地表面에 겨울에는 凍結하고
여름에는 融解하기를 反覆하는 活動層(Active
Layer)이 있고 그 아래에 永久凍土(Permafrost)
가 存在하게 된다(그림 2).

시베리아 地域의 活動層의 깊이(Thaw Depth)

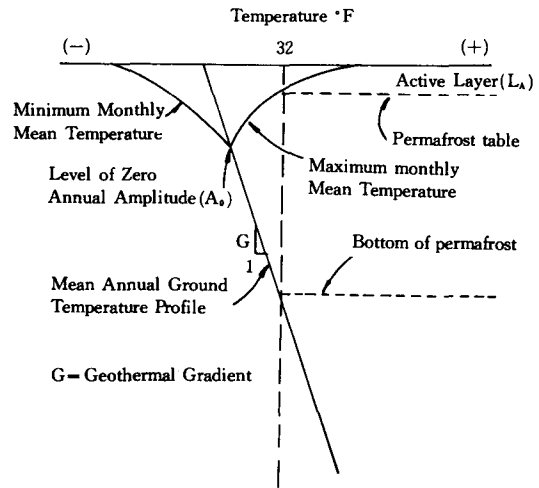


그림 2 永久凍土의 地温分布 [1]

및 永久凍土層의 두께 分布를 그림 3 및 그림
4에 나타내고 있다.

極寒地에서의 基礎工의 問題는 地表面의 季節
的 凍結融解를 반복하는 不安定한 活動層을 避
(貫通)하여 永久凍土層에 基礎를 세우거나 또는
活動層을 凍結하여 安定시킨 後 基礎를 세우는
方法으로 大別되며 上記 어느 方法이던 基礎工으
로 因한 地盤의 熱의 安定(Thermal Stability)
을 攪亂하지 않고 維持시키는데에 歸着하게 된
다.

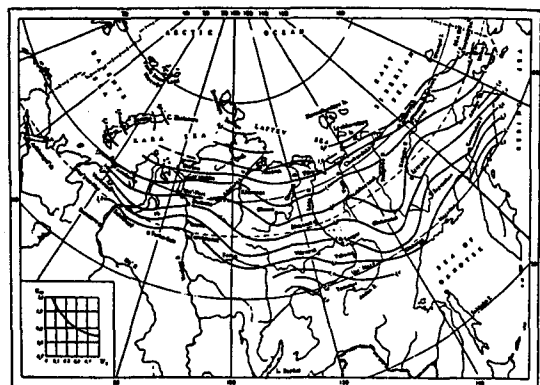


그림 3 Isotherms of seasonal thaw depths of
clayey soils. [2]

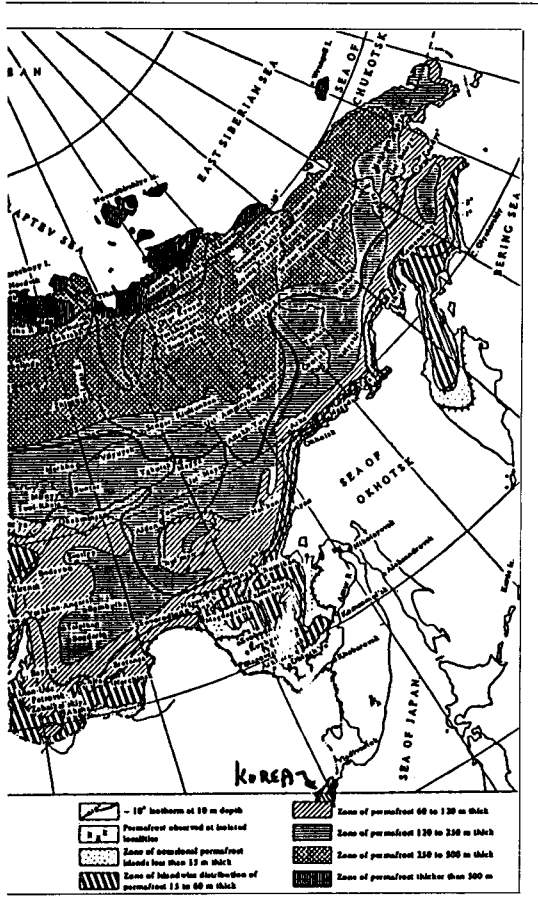


그림 4 시베리아(極東)의 永久凍土層의 두께 및 溫度分布 [2]

熱的安定이 깨지면 融解深度(Thaw Depth)가 깊어지게 되며 人工的으로 그것을 原狀恢復시킨다는 것은 매우 어렵다(非經濟性). 凍土의 表面을 攪亂하면 永久凍土가 如何히 파괴되는가를 보여 주는 實驗例를 그림 5에 나타내고 있다.

이 實驗은 Alaska에서 200ft×200ft(60m×60m)의 面積을 3等分하고 그 地表를:

- A: 地表를 自然狀態로 放置
- B: 나무와 관목만을 除去
- C: 一切의 草木을 제거하고 整地(stripping)한 區域으로 나누어 長時間 經過하면서 永久凍土

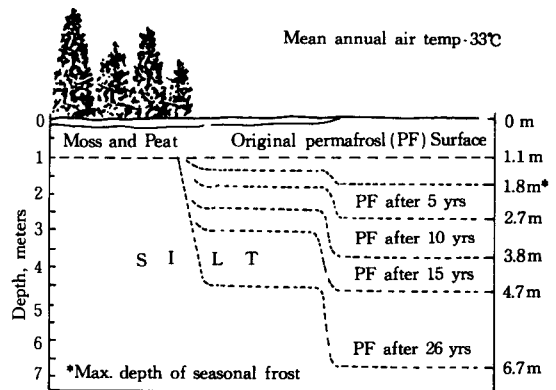
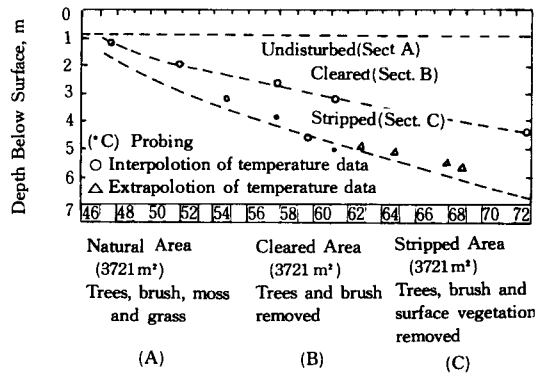


그림 5 地表교란에 따른 永久凍土의 變化 [1]

의 深度의 變化를 觀察한 結果이다. 26년이 經過한후 A區域의 永久凍土는 變함없이 地表下 1.1m내에 存在하는데 B區域, C區域은 各其 4.5m, 6.7m로 깊어지고 있음을 잘 보여주고 있다.

지금까지 溫暖帶 地域에서의 工法에만 익숙한 우리가 永久凍土에 進出함에 있어서 開發의 첫삽을 뜨기 前에 銘心할 事項은 바로 이와 같이 凍土의 銳敏한 熱的安定을 교란하지 않고 自然상태를 保存하는데에 여태까지 經驗해본 바 없는 細心한 配慮를 要하며 凍土의 土質工學의 特性을 理解한 뒤에 그에 相應하는 基礎工法을 採擇해야 한다는 것이다.

2. 極寒地 基礎工의 種類

2.1 分類方法

極寒地 基礎工 設計의 一般의 接近方法은:

(1) 劣惡한 地盤條件은 可하거나 最少化.
 (2) 工事着手前 機械的 또는 熱的處理에 依한 地盤條件의 改善.

(3) 構造物 荷重 및 地盤의 熱的平衡(Thermal Regime)의 교란으로 因한 變位에 견디도록 構造를 設計.

(4) 使用期間中 地盤의 熱的平衡을 許容限度 以內로 制禦, 維持.

等으로 要約되며 實際에 있어서는 이들 方法을 併用 採擇하게 된다. 이와 같은 基礎設計를 다시 크게:

- 1) 自然凍結型(Passive Technique)
- 2) 人工凍結型(Active Technique)

으로 區分하는 바 前者는 動力이나 機械(moving parts)를 全然 使用치 않고 自然現象을 利用하여 前記한 地盤處理 및 熱的平衡의 制禦를 하는 方法을 말하며 後者는 動力과 機械를 使用하여 人工的으로 같은 目的을 達成하는 方法이다. 人工凍結型은 繼續的인 維持補修(maintenance)가 必要하고 값싼 電力이 中斷없이 供給되는 곳에서만 使用이 可能하다.

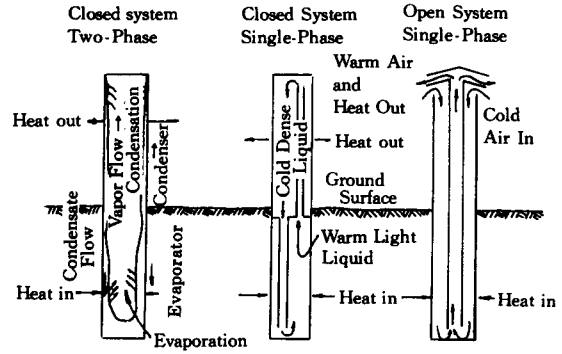
自然凍結型은 融解된 地盤 또는 不連續帶 永久凍土(Discontinuous Permafrost) 및 連續帶 永久凍土(Continuous Permafrost) 어느 곳에도 使用하며 建設當初에 설치하거나 使用途中 基礎改善의 手段으로 설치하는 수도 있다.

人工凍結型은 地盤의 熱的平衡을 制禦함에 있어 埋設된 配管을 통한 加熱 또는 冷却 媒體의 強制 循環, 蒸氣, 물 등의 注入, 電熱投入 등의 手段을 使用하는 方法이다.

2.2 自然凍結型(Passive Technique)

1) 自然對流型 시설(Natural Convection Devices)

自然對流型은 閉鎖型(Closed type)과 開放型(Open type)으로 區分되며 이중 閉鎖型은 다시 單狀型(Single Phase)과 二狀型(Two Phase)으로 分類된다. 開放型은 恒常 單狀型이다.



(a) Thermosyphon (b) Convection tube (c) Air Convection Pile

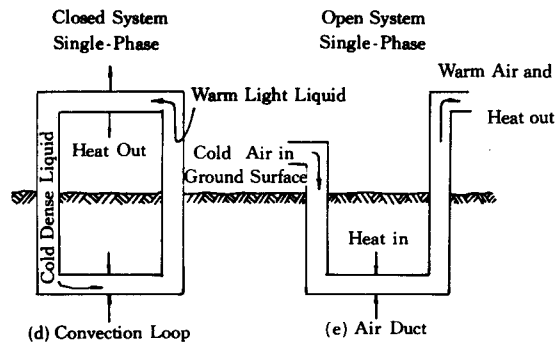


그림 6 自然對流型施設 [3]

이들 分類의 모양을 그림 6의 (a), (b), (c)에 보여 주고 있으며 (d)와 (e)는 各其 (b)와 (c)의 같은 原理를 使用한 代案의 형태를 나타낸다.

이들의 作動原理는 모두 地上(大氣)과 地中の 溫度差(冬季에 地上溫度가 낮을 때)에 따른 作動流體(Working Fluid)의 密度差에 의한 流動을 利用하는 것이다. 장치의 地中 下部에서 地熱이 傳達되면 作動流體가 加熱되고 密度가 減少되면서 上昇한다. 地上에 露出된 上部에서는 熱을 大氣中에 傳達하므로써 作動流體가 冷却하여 密度가 커지고 下降하게 된다. 이와 같은 循環 Cycle은 地上의 大氣溫度가 地中溫度보다 낮은 동안은 계속하게 된다.

開放型에서는 作動流體가 장치내에 流入한 후 밖으로 流出하게 되는데, 따라서 作動流體는

空氣이며 熱의 傳達은 感熱(Sensible heat: 熱量에 따라 溫度變化를 일으키는 熱)에 依한다.

閉鎖型에서는 一定量의 作動流體가 계속하여 循環하게 되며 二狀型의 경우에는 作動流體는 氣體(Gas)로서 上昇하고 液體(Fluid)로서 下降하게 되며 熱의 傳達은 主로 潛熱(Latent heat: 溫度는 變化시키지 않고 물질의 狀의 變換에 消耗되는 熱)에 依한다.

위의 3가지 方式의 特性을 比較하면 다음에 列擧하는 바와 같다.

(1) Thermosyphon이 3方式中 가장 效率이 높는데 그것은 作動流體의 潛熱이 溫度差에 依한 感熱의 效果보다 훨씬 크기 때문이다. 一定量의 作動流體의 流量(Flow Rate)에 對한 熱의 傳達量은 狀의 變換(液體의 증발 또는 증기의 凝結)이 있는 경우에 훨씬 더 크다.

(2) Convection Tube나 Air Convection Pile은 冷·溫 作動流體를 分離시키는 分離壁(Internal Flow Divider)이 必要하게 된다.

이에 比하면 Thermosyphon의 gas의 上昇과 液體의 下降 Cycle은 더욱 效果的인 自然對流方式으로서 單狀對流 System인 Convection Tube나 Air Convection Pile 보다 더욱 적은 溫度差에서도 作動하게 되고 따라서 季節의 有效作動期間도 길어지게 된다.

(3) Convection Tube나 Air Convection Pile은 大氣壓下에서 作動하나 Thermosyphon은 使用하는 作動流體에 따라서 壓力容器(Pressure Vessel)로 設計되어야 한다.

(4) 閉鎖型인 Thermosyphon과 Convection Tube는 大氣의 自然 또는 強制 對流와 輻射(Radiation)에 依한 熱傳達을 爲하여 地上에 突出된 部分을 要하게 된다(Radiator: 放熱器).

(5) Air Convection Pile은 꼭 地上에 突出될 必要는 없으나 空氣의 流通을 極大化하고 눈(雪片), 落葉 등의 侵入을 防止할 수 있도록 出入口를 設計함은 勿論 夏季에는 高溫의 大氣에 依한 地盤의 融解와 Duct表面의 結露의 結氷을 防止하기 爲한 機械的 防風門(Mechanical Damper) 등을 설치할 必要가 있다.

(6) Convection Tube의 作動流體로서는 普通 Ethylene glycol과 물의 混合物인 不凍液이 使用되며 比較的 大量의 充塡을 要하고 漏出時에는 周邊 地盤을 융해시킬 위험이 있다.

(7) Thermosyphon의 內部에서 作動流體에 의한 容器의 腐蝕으로 非凝縮性 gas(Non-condensing gas)가 發生하여 上部의 放熱器(Radiator)에 集中하게 되면 作動流體의 凝結을 妨害하고 따라서 大氣에의 熱傳達을 막게되는 경우도 있다.

(8) 모든 自然對流型 시설은 오직 冬季에만 作動하게 되므로 夏季의 地盤溫度 上昇을 能가할 만큼의 凍結을 할 수 있는 容量이 所要되는 바 따라서 다음에 記述하는 斷熱材(Insulation)를 併用하는 경우가 많다.

以上の 比較에서 보는 바와 같이 그 卓越한 熱傳達效率, 製作, 設置의 容易性, 유지 관리의 간편, 工費의 低廉 등 長點이 있는 Thermosyphon이 가장 널리 使用되고 있다. 그러므로 아래에 Thermosyphon에 대하여 좀더 詳論하기로 한다.

2) Thermosyphon

(1) 形 狀

Thermosyphon의 形狀은 構造上의 用途에 따라 杭型(Piling)과 非構造型(Non-structural) Thermosyphon으로 區分되는 바 前者는 冷凍作用과 아울러 말뚝으로서의 構造材의 機能(支持力 및 휨저항)을 兼備하는 것으로서 말뚝을 密閉하여 作動流體를 充塡하고 放熱部(Radiation Area)를 갖추므로서 이루어진다. 非構造型 Thermosyphon은 密閉된 容器(Tube)內에 作動流體를 充塡하고 凝結部(Condenser End)에 放熱翼(Radiation Fin)을 달아서 放熱面積을 增加시킨다(그림 7).

凝結部는 시설물의 조건에 따라 蒸發器(Evaporator)와 相當한 距離를 떨어져서 建物 屋上이나 건물로부터 6~15m 떨어진 地上에 設置하는 例도 있다.

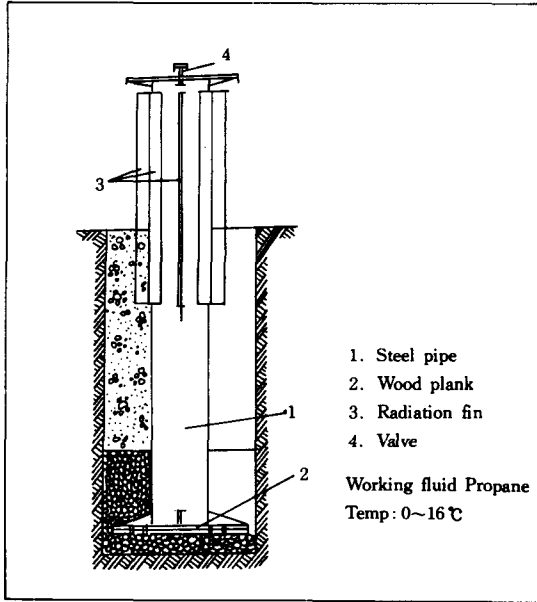


그림 7 Long Thermopile [2]

(2) 재료

① 작동유체

작동유체는 적절한 증기압(Vapor Pressure), 높은 열전도율(Thermal Conductivity), 저온작동에 알맞는 동결점(Freezing Point), 높은 밀도와 낮은 점성(循環流動을 용이하게 하기 위하여), 용기 재료와의 화학적 안정성 등이 요구된다. 다음 표 1에 널리

표 1 Toxicity, Flammability and Metal Compatibility of Several Working Fluids

Fluid	Toxic	Flammable	Steel	Aluminum	Copper	Stainless
Ammonia	H	S	C	C	N	C
Freon-12	M	M	C	C	C	C
Carbon Dioxide	M	M	C	C	C	C
Propane	S	H	C	C	C	

H-Highly
M-Mildly
S-Slightly
C-Compatible
N-Non or not compatible

쓰이는 작동유체의 유독성, 인화성, 용기 재료와의 적합성 등을 비교하여 표시하고 있다.

② 용기(Container)

Thermosyphon의 용기는 普通鋼(mild steel), Aluminum, 銅 등이 많이 사용되나 특별한 경우에 Stainless Steel이나 저온용 강(Low Temperature Steel)이 쓰인다. 재료는 표 1을 참고로 작동유체와 적합되고 구조상 강도에 맞도록 선택해야 한다. 현재까지 가장 고압의 작동유체는 CO₂로서 0°C에서 505.3 Psia이며 대부분의 구조용 강 pipe를 사용하는데 별로 문제가 없다. Radiation Fin에는 Aluminum, 普通鋼 등이 많이 쓰인다.

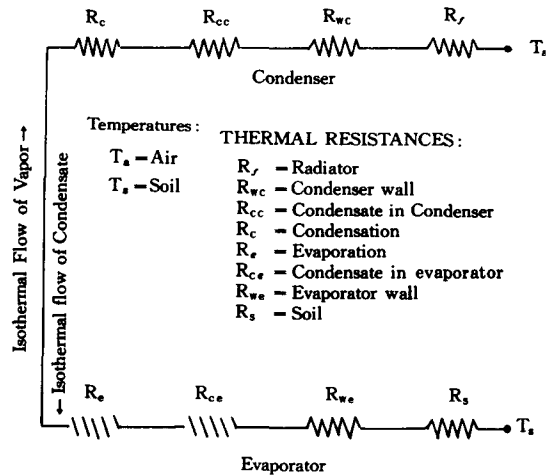


그림 8 Thermal circuit for thermosyphon. [3]

(3) 열전달 Cycle

그림 8에 二狀型 Thermosyphon의 열회로(Thermal Circuit)를 나타내고 있으며 다음 공식으로 열전달을 표시할 수 있다.

$$q = \frac{T_s - T_a}{R_s + R_{we} + R_{ce} + R_e + R_c + R_{cc} + R_{wc} + R_r}$$

普通 R_r 및 R_s 가 다른 열저항(Thermal

Resistance) 보다 크며 R_f 는 다음 公式로 表示된다.

$$R_f = \frac{1}{Aeh}$$

h : 熱傳達係數(Heat Transfer Coefficient)
Radiator 周圍의 空氣流速 및 Radiator의 表面特性에 依함

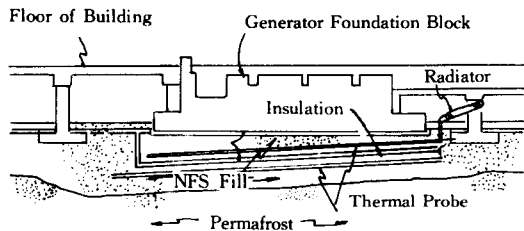
e : Fin 效率

Fin의 形狀, 材質, 表面傳導率 등에 따름

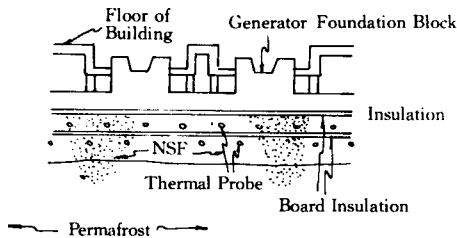
A : Condenser의 全 露出面積

(4) 設置方法

Piling 自體를 Thermosyphon으로 만들거나 別途의 Thermosyphon을 piling 옆에 설치하는 方法이 건물, Tower, Tank 및 Pipeline 등에 널리 使用되어 왔다. 그림 9에 보는 바와 같이 永久凍土 위에 粒狀盛土(NSFM: Non-Frost-Susceptible Material)를 한 후 그 속에서 Thermosyphon을 설치하고 建物底面과 盛土 사이에 斷熱材를 설치(單層 또는 二層)하는 基礎工法이 널리 使用되고 있다.



(a) Elevation of generator foundation, showing thermal probes and insulation.



(b) Cross section of generator foundation, showing thermal probes and insulation.

그림 9 Thermal probe를 이용한 건물기초 [4]

비슷한 工法의 例를 그림 10, 11에 보여 주고 있는데 그림 11의 Hangar 건물은 主構造의 基礎는 永久凍土에 打入한 杭基礎로 하고 床版 기초에 Thermosyphon을 使用하고 있으며 Concrete

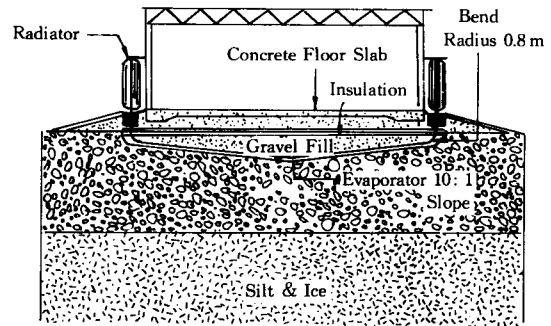


그림 10 캐나다의 Ross River 학교 [5]

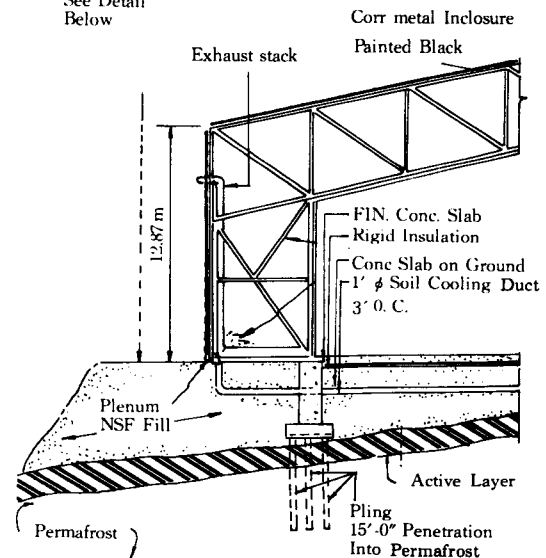
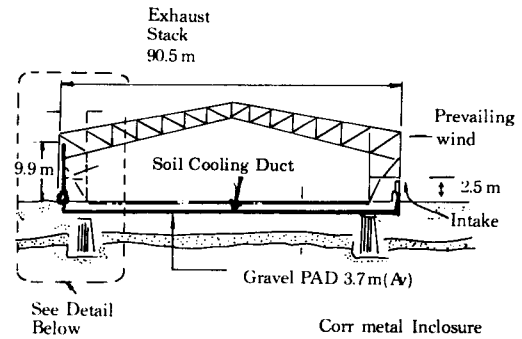


그림 11 Arctic Const-Blue Jay HANGAR [6]

Slab 中間에 斷熱材가 挿入된 Sandwich 型으로 되어 있음이 特徵이라고 할 수 있다.

(5) 氣候條件에 대한 考慮

Thermosyphon 은 當該地域의 平均(mean) 및 極限(extreme) 氣候條件을 考慮하여 설계하여야 한다. 最惡條件으로서 가장 溫暖한 겨울 뒤에 가장 高溫의 夏季가 繼續된 경우의 地盤의 응해를 계산하고 이 경우에 安全率 1.25가 確保되도록 Thermosyphon system의 凍結容量을 設計하여야 한다. 風速은 放熱器의 熱傳達 效果에 至大한 影響을 미치므로 氣溫과 아울러 重要한 考慮要素이다.

3) 斷熱工(Thermal Barrier, Insulation)

斷熱工이란 熱傳導率(Conductivity)이 낮은 物質로 된 層으로서 Plastic Foam, Fiberglass 등이 쓰인다. 地上에 덮인 눈(雪), 乾燥한 有機物이나 土壤도 斷熱材의 機能을 한다.

一般的으로 斷熱材는 密度(Bulk Density)가 낮고 微小한 氣孔을 多數 內包한 多孔性 物質로서 그 낮은 傳導率은 大部分의 熱傳達이 氣孔속의 空氣를 통한 傳導에 依하기 때문이다. 따라서 斷熱材의 理想的 傳導率 下限値는 空氣의 傳導率 0.015 Btu/hr-ft-°F 를 증가할 수 없다고 볼 수 있다. 그러나 어떤 合成斷熱材는 熱傳導率을 더욱 낮추기 爲하여 氣空을 gas(Heavy Molecule Gases)로 充填하거나 部分的 眞空化를 시키는 경우도 있으나 斷熱材를 完全히 密封(Seal)할 수 없는 限 空氣가 점차 단열재 속으로 擴散하여 熱傳導率이 높아지게 된다.

가장 널리 쓰이는 合成 斷熱材는 Polyurethane, Polystyrene, Polyvinylchloride, 粒狀 Calcium Carbonate 등이며 앞의 二者가 가장 普遍的이다. Polyurethane은 比較的 傳導率이 낮아 높은 溫度差에 使用되며 現場에서 噴霧式(Spray applied) 設置 또는 現場成形도 可能하고 큰 板材型으로 供給되기도 한다.

Polystyrene은 板材型(Board Stock)으로만 供給되는데 비교적 낮은 吸水性을 갖고 있다. 射出(Extruded) Polystyrene이 팽창(Expanded)

Polystyrene보다 品質이 더 優秀하다.

勿論 斷熱材의 使用은 熱傳達의 防止에 主目的이 있으나 그 吸水性, 構造材의 性能 및 耐腐蝕性도 重要한 考慮要素이다. 水分의 吸收로 因한 斷熱材의 熱傳導率의 增加를 살펴보면 물의 熱傳達率은 0.33 Btu/hr-ft-°F 이고 얼음은 1.3 Btu/hr-ft-°F 이며 各其 空氣의 20倍 90倍에 해당한다. 따라서 含水率의 근소한 增加는 熱傳導率을 크게 增加시키게 되므로 斷熱材의 水分 吸收를 防止하도록 해야 한다. 그림 12에 Polystyrene의 含水量과 熱傳導率의 關係를 나타내고 있다.

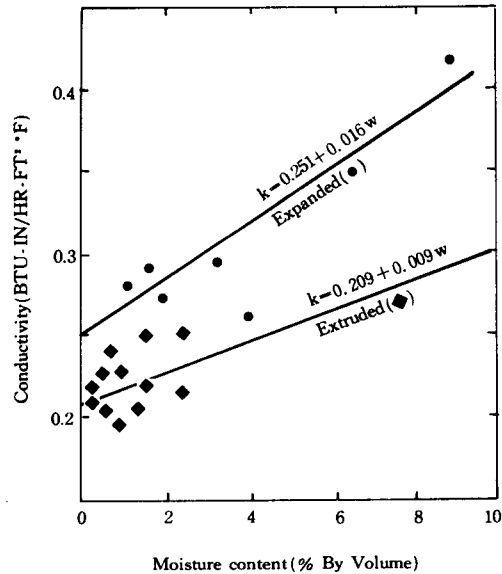


그림 12 Polystyrene의 含水量과 熱傳導率 [3]

斷熱材의 效果는 熱抵抗值(R)로 表示한다.

$$R = \frac{X}{K}$$

X: 斷熱材의 두께

K: 斷熱材의 熱傳導率

그 代表的인 斷熱材의 R値는 표 2에 보여준 바와 같다.

斷熱材는 그 設置方法에 따라 斷熱效果가 달라지며 건물 床面 및 埋設 pipeline의 斷熱效果를

표 2 斷熱材의 熱抵抗值

Type	R-Value / Inch (hr-ft ² -°F / Btu-in)
Fiberglass	3.5
Expanded Polystyrene (Bead Board)	4.0
Extruded Polystyrene	5.0
Polyurethane & Polyisocyanurate	6.0~7.0

比較한 것을 各各 그림 13, 14에 보여 주고 있다.

End of Slab insul.	2Ft wall insul.	No insulation	End of Slab + 4FT Slab Insul.
Ratio=0.98	Ratio=0.87	No Snow Ratio=1.30	No Snow Ratio=1.00
1 Ft wall + 4 Ft Hor. Skirt Insul.	End of Slab + 4FT Slab Insul.		
Ratio=0.88	Ratio=0.82	No Snow Ratio=0.95	

Slab with Grade Beam Fairbanks. Ratio = Insulated Heat Loss/Uninsulated Heat Loss in Silt

그림 13 건물 床面の 熱損失 [3]

	Z/D = 5	Z/D = 10
A	MSF = 2.11	MSF = 1.67
B	MSF = 0.21	MSF = 0.21
C	MSF = 0.38	MSF = 0.36
D	MSF = 1.4	MSF = 1.23
E	MSF = 3.33	
F	MSF = 2.8	
G	MSF = 0.22	
H	MSF = 0.41	
I	MSF = 1.22	

D=Pipe Diameter
Z=Burial Depth from Ground Surface to pipe Centerline
Insulation Thickness = D/2 Conductivity = 0.017 Btu/HR. FT. °F
Pipe Centerline at Mid-Depth of Berm

그림 14 埋設 Pipe의 熱損失 [3]

$$MSF = \frac{Q_T}{K\Delta T} \text{ (Modified Shape Factor)}$$

Q_T = 埋設 Pipe로부터의 全體熱損失

K = 熱傳導率

ΔT = Pipe 表面 및 地上의 溫度差

4) 熱貯留施設(Heat Sink)

一般的으로 熱을 貯留하여 그 周圍의 凍結이나 融解를 防止하는 物體의 集積(mass)을 熱貯留施設이라 한다. 가장 널리 사용되는 것이 두꺼운 砂礫層이며 斷熱工과 比較할 때 熱抵抗値는 떨어 지지만 感熱(Sensible heat)과 潛熱(Latent heat)을 포함하여 全體 熱貯留能力은 卓越하다고 할 수 있다. 清潔한 砂礫은 密度가 높고 細粒 物質(Fines)의 含量이 적어 凍上(Heave)의 影響을 받지 않는다(Non-frost-susceptible).

極寒地의 連續帶 永久凍土에서 砂礫道路가 널리 使用되는데 그 두께는 夏季의 계절적 融解를 모두 制禦할 수 있도록 定한다. 地盤이 이미 融해된 곳에서는 砂礫層은 地盤의 凍上을 防止하기 위한 手段으로 使用되는데 이 때에는 그 두께는 融解의 防止보다는 凍結의 防止를 目的으로 決定한다. 夏季에 砂礫層에 貯藏된 熱이 冬季의 融해지반의 凍結深度를 낮추도록 制限하는 役割을 하게 된다.

건물기초나 埋設 Pipeline에서도 砂礫層 熱貯留 시설을 利用한다. 이 경우에는 Thermosyphon 이나 斷熱工(Thermal Barrier) 등과 함께 複合的으로 使用되는데 斷熱材는 熱源(Heat Source)에 近接하여 설치하고 熱貯留 시설은 斷熱材의 熱源反對쪽에 설치한다. 그리고 熱貯留 시설內에 다 Thermosyphon을 追加的 冷却 시설로 설치한다(그림 9, 10 참조)

合成 熱貯留 시설을 使用코져 할 때는 그 凍結 溫度(Freezing Temperature)와 潛熱(Latent Heat)이 重要な 要素이다. 潛熱이 클수록 熱貯藏 容量이 커지며 凍結 溫度의 선택은 使用目的에 따라서, 地盤의 融해방지가 目的인 때에는 地盤의 凍結 溫度보다 낮게, 凍結防止가 目的인 경우에는 높은 것을 擇하여야 한다.

鹽溶液은 좋은 응해방지용 熱貯留시설로 使用할 수 있는데 그것은 물이 相當히 높은 潛熱을 갖고 있으며 凍結溫度를 鹽의 濃度에 따라 쉽게 調節할 수 있기 때문이다.

5) 高架式 構造(Elevated Construction Modes)

構造物을 Pile, 기둥 및 Footing 등으로 支持시키고 地上으로부터 격리시키는 이 方法은 永久凍土에서 가장 普遍的으로 쓰인다. 이 方法은 熱源과 地表사이에 空間을 두므로서 熱源을 斷切시키고 空氣의 흐름으로 熱傳達을 차단하는 것이다. 이 때에 考慮할 事項은 空氣의 順調로운 流通, 건물 밑에 積雪의 防止, 補修維持에 必要한 通路의 설치 등이다. 그림 15에 여러가지 형태의 건물의 구조양식을 보여 주고 있다.

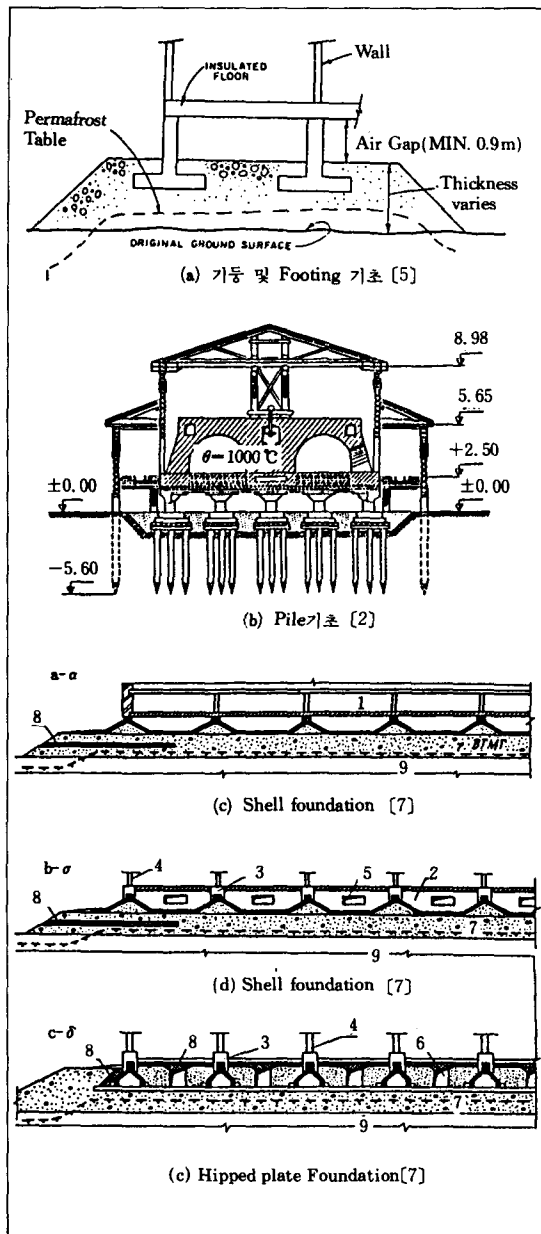


그림 15 高架式 構造의 例

6) 地表面處理(Ground Surface Modification)

모든 建設工事は 반드시 地表의 熱的 均衡(Heat Balance)을 攪亂하게 되며 그 結果는 地盤內로의 熱流入을 招來하게 되는데 앞에 列擧한 方法으로 構造物을 地表上에 격리시키거나 두꺼운 斷熱工을 하므로서 熱源을 차단하게 된다면 이 地表攪亂만이 熱源으로 남게 된다. 이미 그림 5에서 地表面의 攪亂이 地盤의 熱的均衡을 如何히 變化시키느냐 하는 것을 考察한 바 있다. 地表面의 攪亂은 大部分의 경우 永久凍土의 응해를 초래하는 有害한 것으로 看做되고 있으나 경우에 따라서는 工事着手前에 永久凍土의 응해 촉진(Prethaw)에도 쓰이며 이미 응해된 地盤에 熱流入을 增加하므로서 凍土를 減少시키는 데도 쓰인다.

地上을 Paint로 塗裝하므로서 太陽輻射熱의 吸收率을 輕減시키는 方法이 滑走路에서 쓰인 例도 있다. 눈(雪)은 약 0.1 Btu/hr-ft²의 比較的 낮은 熱傳導率을 갖고 있어 有效한 斷熱材의 役割을 하며 겨울에 積雪 두께가 얇은 곳은 地盤의 冷却을 증가시키고 反對로 積雪이 두꺼운 곳은 冷却을 감소시킨다.

그림 16에서 보는 바와 같이 積雪層이 얇은 路面보다 積雪層이 두꺼운 路肩 및 側溝部의 응해심도가 더 깊은 것을 알 수 있다.

湖沼(Pond)는 熱貯留施設의 역할을 하므로서 大部分의 冬季의 冷溫은 湖水의 凍結에 消耗되고 그 밑에 있는 地盤의 冷却에는 못 미치게 된다.

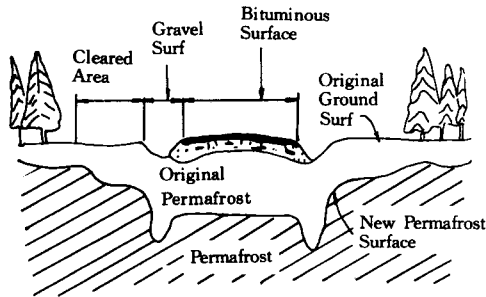


그림 16 도로단면의 永久凍土의 變化 [8]

따라서 工事로 因한 湖沼의 形成은 可及的 피하 도록 하여야 한다.

地表面의 교란을 피하기 위하여는 冬季에 工事를 시행함이 좋다. 그러나 砂礫層內에 斷熱材를 설치하는 工事의 경우에는 그 斷熱材가 活動層의 再凍結(Freezeback)을 防害하지 않도록 늦은 겨울까지 기다린 후에 施行하여야 한다. 熱貯留 시설로서의 砂礫層은 夏季에나 가을에 시행하는 것이 좋다. 冬季에 공사를 하면 適切한 다짐을 기대할 수 없기 때문이다.

7) 杭基礎(Piles)

極寒地에서의 Pile 基礎의 特徵은 Pile이 活動層을 貫通하여 永久凍土內에 根入되므로서 그 支持力은 主로 Pile 周面의 凍着力(Adfreeze)에 依存한다는 것이다. 또 많은 경우에 Pile은 構造物을 地上으로 격리시키고(高架式 構造) 地表面과 建物底面과의 사이에 空間을 두므로서 冬季에 冷氣를 Pile, 地盤 및 建物의 熱貯留시설로 活用할 수 있게 된다.

Pile은 Pile 直徑보다 10~20cm 더 큰 直徑의 구멍을 Auger로 굴착한 後 그 안에 Pile을 插入하고 그 外周空間을 모래와 물을 混合한 Slurry로 充填하여 凍結시켜 完成하는 方法(그림 17)을 가장 普遍的으로 使用하고 있다. Pile孔을 굴착하기 위하여 증기(steam)나 Water jet를 사용하는 경우도 있으나 注入되는 증기나 물(冷水 또는 温水)로 因한 地盤內의 熱的 攪亂을 초래하므로 不利하다.

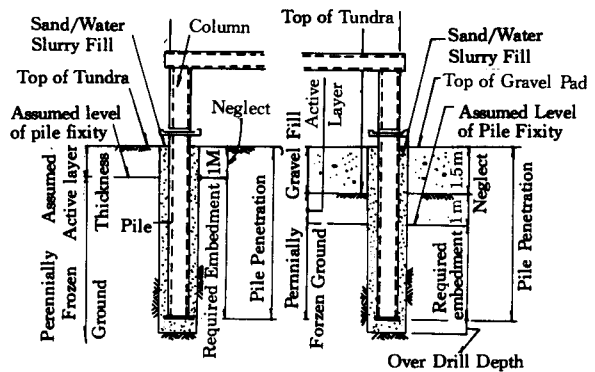
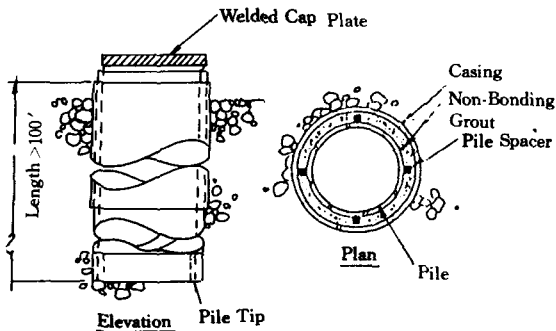


그림 17 Pile 기초의 개념도 [9]

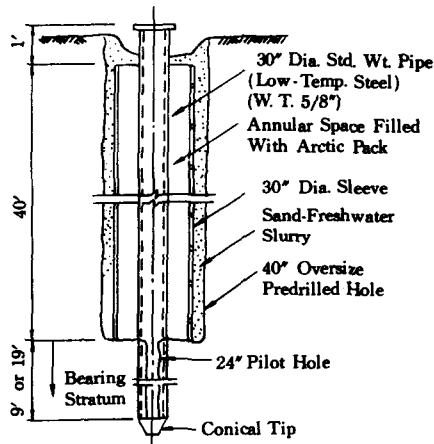
Pile 基礎工事는 Pile孔 굴착의 容易, Slurry의 빠른 凍結 등으로 冬季에 實施하는 것이 有利하나 夏季에 工事를 하려면 活動層(Active Layer) 部分의 Pile孔의 붕락을 防止하기 위하여 Casing을 설치하고 굴착, 插入, Slurry 充填 등 一連의 作業을 신속히 시행하여 地盤內의 熱的 攪亂을 最少化하고 必要하면 말뚝工事로 因한 地盤 교란 및 응해를 凍結시키기 위하여 自然對流型 시설(Natural Convection)이나 機械的 凍結工法을 시행하여야 한다.

H-Pile이나 Pipe pile을 Impact Hammer, Vibrating Hammer 등으로 直接 打入하는 方法도 쓰이나 小口徑의 Pilot Hole을 굴착하여 温水를 채운후 杭打를 하므로서 打入을 容易하게 하는 方法도 있다. 直接杭打工法은 地盤의 溫度가 年中, 가장 높은 늦가을에 施行하는 것이 有利하다. 直接打入方法은 地盤의 熱的 均衡 교란의 最少化, 即時載荷의 加能, 工期促進, 工法의 簡單, 季節에 無關한 施工性 등의 長點이 있다.

말뚝은 勿論 長期荷重에 對한 Creep을 最少化할 수 있도록 長期凍着力을 保障할 수 있는 根入長으로 設計되어야 한다. 極寒地에서의 Pile 基礎에 있어서 考慮할 事項은 活動層의 凍結에 따르는 凍上(Frost Heave) 問題이다. 이 凍上防止를 위하여 特別히 考察된 Pile의 例를 그림 18에 보여 주고 있다. 永久凍土의 응해에 依한 下向引



Non-bonding Grout 모래와 重質 Oil 또는 Grease 混合物
(a) 直接抗打式 (Antijacking Pile) [10]



Arctic Pack: Oil-Sand-Wax 混合物
(b) 挿入式 (STP Pile)

그림 18 Pile의 凍上防止를 위한 特殊 Pile 例

力(Down drag) 및 Creep 에 對한 充分한 考慮도 必要하다.

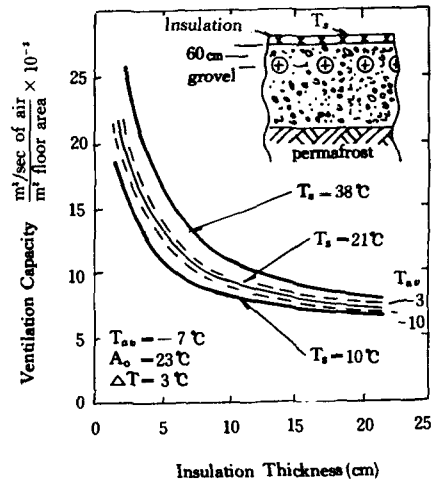
2.3 人工凍結型 (Active Techniques)

1) 強制換氣式 바닥기초 (Forced Ventilation Pad)

建物底面に 斷熱材를 시공한 후 바닥기초內에 空氣 Duct 를 설치하고 밖의 찬 空氣를 流動시켜 건물로부터 傳達되는 熱을 遮斷하고 Duct 下部

의 基礎와 地盤을 凍結시키는 工法은 오래전부터 널리 使用되어 왔다. 그러나 이와 같은 冷熱效果를 얻기 위하여는 Duct 內의 空氣 流速을 一定以上으로 維持해야 하는바, 數個의 Duct 를 Manifold 로 連結하고 굴뚝을 屋上까지 延長하는 등 自然換氣 方法도 利用되지만 건물의 規模가 커지면 恒風 (Prevailing Wind)의 風向, 風速 등이 不確實한 自然通風에 依存할 수 없고 強制換氣式 Duct 시설이 쓰이게 된다.

그림 19는 通常 使用되는 斷熱材 두께의 범위 내에서 自然換氣에 의한 Duct 內의 冷却氣의 流量과 斷熱材 두께와의 關係를 나타내고 있다.



T_s - Structure temperature
 T_{av} - mean of duct air temperature sine wave
 A_s - amplitude of duct air temperature sine wave
 ΔT - allowable temperature rise through ducts

그림 19 冬季의 冷却 Duct의 換氣所要 [12]

強制換氣式 바닥기초에는 크게 두가지 방식이 있으며 그 첫째는 氣溫이 一定溫度(例를 들면 -5°C) 以下에서만 作動되도록 溫度感應式 制禦 (Thermostatic Control)를 하고 斷熱材를 한 層만 構造物 底面に 설치하는 方法이다. 둘째 方法은 또 하나의 斷熱層을 Duct 下部에 설치하고 Duct는 年中 계속 作動하여 換氣시키는 方法

이다. 이 경우 Duct 中心線 以下의 部分은 Duct 排出口 部分의 溫度를 外氣溫度로 하는 露出된 바닥기초(Exposed Pad)로 設計하는 것이다.

夏季에 溫度感應式 換氣장치의 作動이 中斷된 상태에서(約 180日間) 기초지반의 융해를 防止할 수 있는 砂礫層과 斷熱材의 두께를 設計하는 Chart 를 그림 20에 나타내고 있다.

Duct는 대개 直徑 0.3~0.75m 이고 中心 간격은 直徑의 3~4 倍로 설치한다. 이들 Duct 3~6 個를 하나의 Manifold 에 連結하고 Duct 出入口 兩側에 垂直管이나 굴뚝을 세우고 그 入口쪽에 Fan 을 설치한다(그림 21).

2) 強制換氣式 Pile(Forced Ventilated Piles)

Pile 기초를 凍結시키는 方法은 Pile 周面の 凍着力을 早速히 획득하기 위하여 사용하는 一時的 方便으로 쓰이는 경우가 대부분이다. 그림 22에서 보는 바와 같이 液體冷媒(Liquid Refrigerant) 나 冷氣換氣式 등의 方法이 있다. 이 方法은 自然凍結型과 比較할 때 維持補修가 必要하고 電氣가 계속적으로 供給可能한 곳에서만 使用이 可能하므로 Pile 설치후 Slurry 凍結用으로 주로 쓰인다.

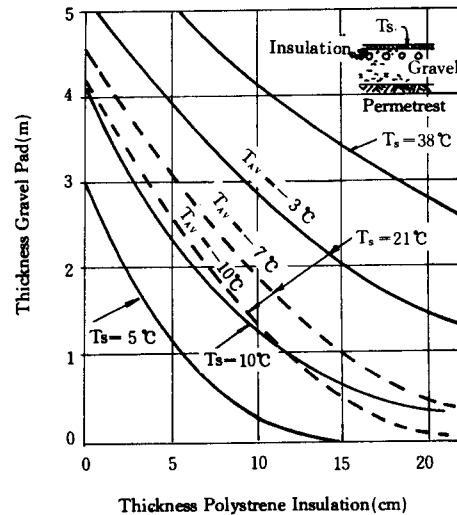


그림 20 夏季中 強制換氣式 바닥기초의 두께 [12]

3) 機械的 凍結工法(Refrigeration)

基礎의 沈下를 嚴格히 制限해야 할 必要가

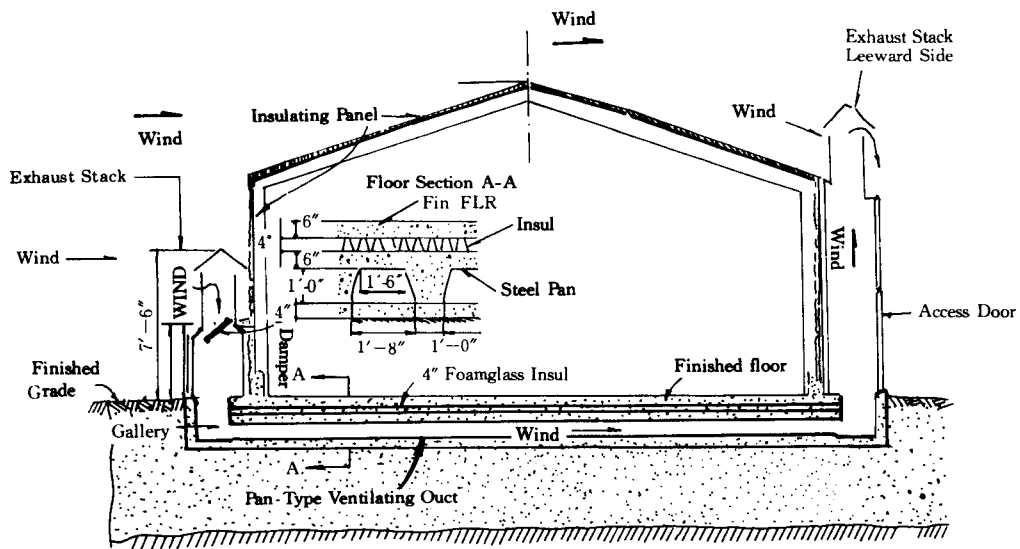


그림 21 Ventilated Pad 기초의 例 [6]

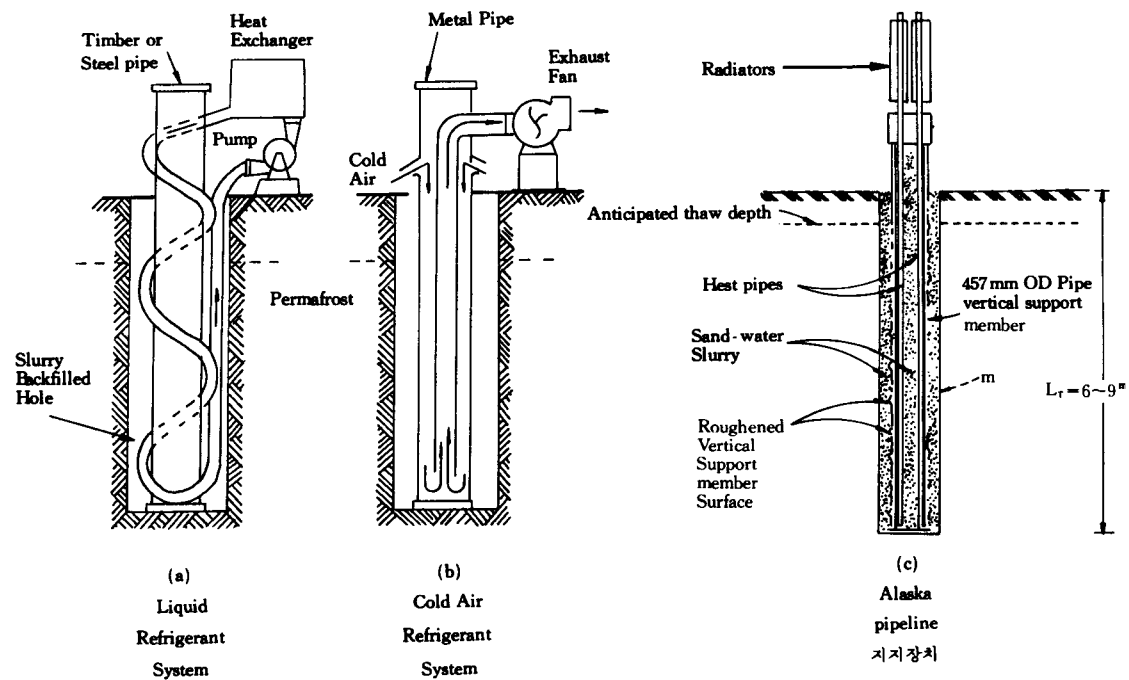


그림 22 Forced Ventiladed Pile의 例 [12] [5]

있는 건물 등에서 機械的으로 基礎를 凍結시키거나 使用途中에 發生하는 基礎의 융해를 再凍結(Freezeback)시켜 永久凍土狀態로 恢復, 維持시키기 위한 方法으로 後設하는 경우도 있다.

이 方法은 大氣의 溫度에 拘碍되지 않고 地반을 凍土로 유지할 수 있는 장점이 있으나 維持, 補修의 所要 및 中斷없는 電力 供給의 必要性 등이 단점이다. 砂礫層 기초 바닥의 두께는 冷凍 장치의 故障 또는 維持補修上 理由로 作動이 中斷될 경우 地반의 융해를 방지할 수 있는 充分한 두께로 設計되어야 한다.

冷媒로는 短期間用으로 Glycol, 鹽水(Brine) 등이 쓰이며 長期用으로는 漏出時 地반의 永久凍土에 影響을 考慮하여 輕質油(Very Light Oil) 나 粘性이 낮은 시리콘液(Silicon Fluid) 등이 쓰인다.

地下水가 많은 곳에서 굴착을 위하여 일시적으로 地반을 凍結시키는 方法도 널리 사용된다.

一定한 間격으로 수직으로 設치된 Pipe 에 Calcium Chloride 용액을 순환시켜 -30°C 까지 凍結시킬 수 있으며 最近에는 液體窒素(LN_2) 를 Pipe 내에 주입하여 $-180^{\circ}\text{C} \sim -190^{\circ}\text{C}$ 에 凍結시키는 方法도 사용된다. 地盤凍結工法은 粗粒의 粒狀土內에 地下水가 많아서 다른 方法으로는 地下水의 처리가 곤란한 경우에 有效하게 채용된다.

2.4 融解工法(Thawing Techniques)

凍結된 地반의 굴착을 용이하게 하기 위하여, 또는 建設着手前에 地반의 壓密과 다짐을 促進시키는 方法으로 융해공법이 사용된다. 융해의 방법에는 증기(Steam), 注水(冷水 또는 温水), 電氣, 太陽熱 등을 利用하며 아래에 各其 그 方法을 詳述한다.

1) 증기융해(Steam Thawing)

증기용해는 閉鎖型(Closed System)과 開放型(Open System)으로 區分되는데 前者는 二重管으로 되어 있어 凝結된 물이 內管을 통하여 Boiler 로 回收되므로서 融해지반의 含水量을 증가시키지 않는 利點이 있다. Steam Pipe 는 自重에 依하여 또는 가벼운 打入의 方法으로 挿入하며 Nozzle 尖端은 $\phi 19\sim 25\text{mm}$ 의 管으로 되어 있다(그림 23 참조).

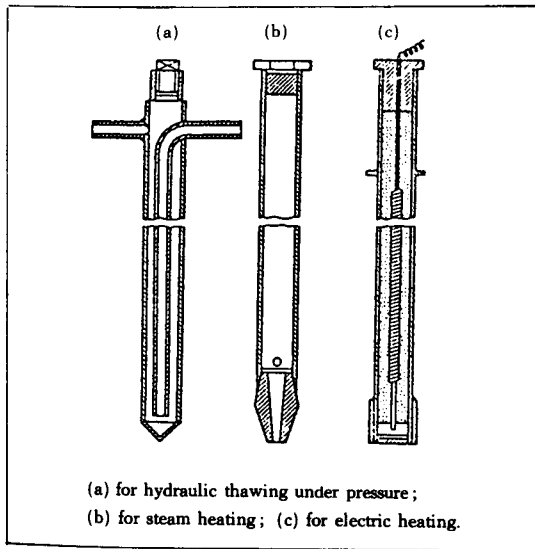


그림 23 지반용해용 挿入管 [2]

粗粒狀 지반에서는 Auger 로 미리 구멍을 천공한 후 挿入한다. Steam Pipe 의 배치는 Pipe 간의 등거리를 유지하도록 그림 24와 같이 正三角배열로 하는 것이 용해를 균일하게 할 수 있다.

2) 注水(溫水 및 冷水) 融解

물의 注入에 依한 融해공법은 排水性이 좋은 粒狀土에 局限하여 使用해야 한다. 冷水의 경우는 太陽熱을 最大限으로 利用하여 注水의 溫度를 높이고 하야 한다. 注水용해가 가장 有效한 경우는 그림 25에서 보는 바와 같이 물의 흐름이 용해된 지반과 凍結地盤의 境界面(Thawing Front)을 따라 이루어질 때이다.

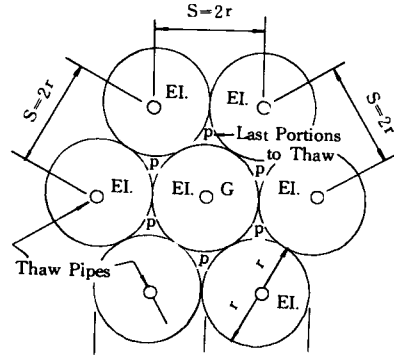


그림 24 融解 Pipe의 配列 [13]

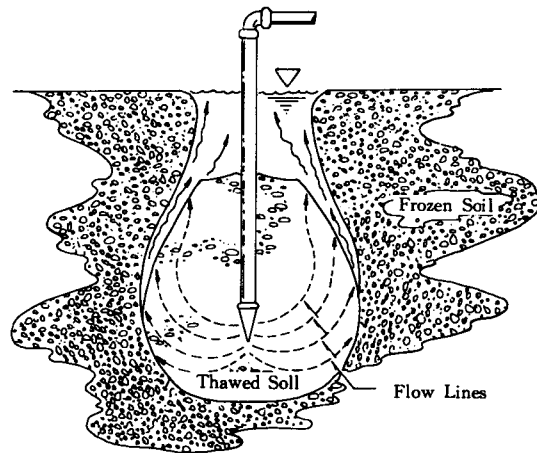


그림 25 注水融解의 斷面 [13]

3) 電氣融解(Electric Thawing)

電氣融解는 地盤中에 穿孔한 후 그 안에다 電氣抵抗體를 挿入하여 發熱시키는 方法(그림 23, (c) 참조)과 地盤中에 電極을 直接 挿入한 후 地盤의 抵抗을 利用하여 發熱시키는 方法으로 區分되나 後者が 더욱 많이 利用된다. 電氣融解는 앞의 두 方法과는 달리 地盤內에 含水量을 증가시키지 않는 長點이 있고 交流를 利用한 전기용해는 特히 排水性이 나쁜 Silt와 Clay 지반에 매우 適合하다. 電氣融解의 또다른 長點

은 겨울에도 쉽게 시행할 수 있다는 것이다. 그림 26은 交流電氣融解工法의 概念을 나타낸다.

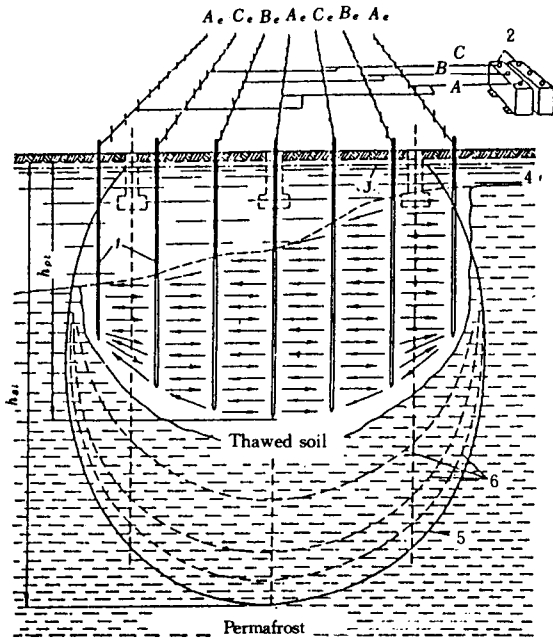
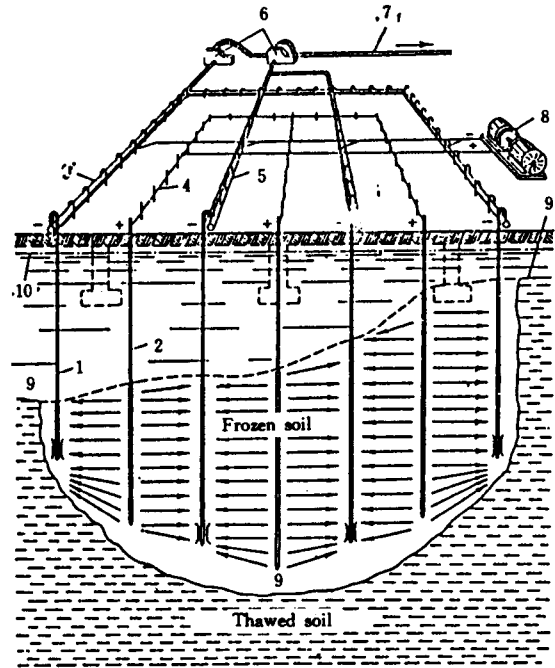


그림 26. 電氣融解法 [2]

전기용해와 동시에 地盤의 壓密과 다짐을 위하여 直流에 依한 電氣滲透工法이 사용된다. 그림 27에 그 概念을 보여준다.

4) 太陽熱融解(Solar Thawing)

地表面에 物質이 없는 경우 太陽熱 Energy의 흐름은 그림 28과 같다. 太陽으로부터 入射하는 輻射熱을 增加시키고 對流, 反射, 地表水의 증발 및 表面輻射 등에 依한 大氣에의 熱損失을 減少시키므로써 地盤內로 더 많은 熱을 受入하여 용해를 촉진하는 가장 簡單하면서도 有效한 方法은 地表를 덮고 있는 物體와 그늘을 지우게 하는 植物을 除去하여 地表를 太陽에 露出시키는 것이다(그림 5 참조). 地表에 불을 질러 태우는 것도 용해심도를 增加시키는 方法이다. 表面을 整地(Stripping)한 뒤에 透明한 Polyethylene 膜을 덮는 方法도 쓰인다. 太陽熱을 利用한 지반용해



(1) cathode needle filter; (2) anode needle filter; (3) connecting hose; (4) electrical conduit; (5) collecting manifold of dewatering system; (6) pumps; (7) water discharge; (8) direct-current source; (9) upper surface of the permafrost; (10) water table.

그림 27. 電氣滲透에 의한 다짐工法 (Electroosmotic Soil Compaction) [2]

는 매우 經濟性이 높은 方法이지만 그 깊이는 土質에 따라 2~8m의 범위이며 所要 깊이까지의 용해에는 數年間이 걸리게 되므로 그 利用에는 目的과 時間所要를 充分히 고려할 일이다.

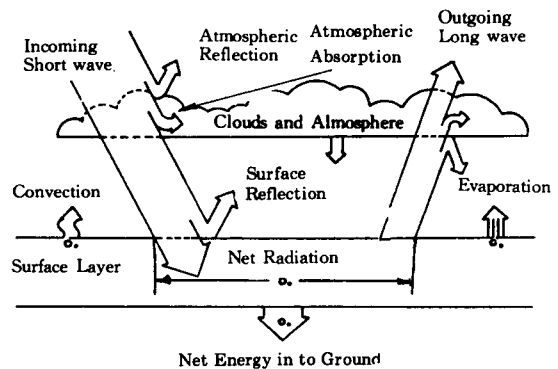


그림 28. 太陽熱 Energy Balance(地表에 植物이 없을 때)[13]

3. 極寒地 基礎工의 選擇

3.1 極寒地 基礎工 選擇에 考慮할 諸要素

앞의 2節에서 極寒地에 使用되고 있는 여러가지 基礎工을 種類別로 列擧하여 記述하였다. 實際 工事의 設計에 臨하여는 現地의 諸要件을 勘案하여 이들中 가장 適切하고 經濟的인 基礎工法을 選擇하여야 하는데 아래의 그 選擇에 考慮할 諸要素를 검토하여야 한다.

1) 設計壽命(Design Life)

極寒地가 아닌 곳에서는 一般的으로 30年의 設計壽命을 표준으로 하고 있으나 極寒地에서는 使用期間의 永久性이 적고 開發 및 技術進歩의 速度가 빠른 點을 考慮하여 耐用年限 5年을 基準하여 基礎工의 選擇에 使用함이 經濟的이다.

2) 長期大荷重(High Long-term Loads)

얼음습윤이 많은 凍土는 그 強度가 載荷期間에 따라 支配되며 短期荷重에 強하나 長期荷重에는 취약하다. 따라서 長期荷重을 받는 構造物은 着地式基礎(On-grade Foundation)로, 短期荷重을 받는 構造는 Pile基礎나 기둥 및 Footing(Post-and-Pad) 기초로 設計함이 좋다. 창고, 물탱크, 연료저장시설, 장비저장 시설 등은 長期大荷重에 屬하고 道路, 滑走路, 送信塔, Pipeline 등은 短期荷重에 屬한다.

3) 短期 荷重(High Short-term Uplift Loads)

風壓 및 地震力 등 短期荷重에 대한 凍土의 強度가 比較的 높기 때문에 교각, 송신탑, 道路 및 滑走路 盛土 등에 對한 이들 短期荷重의 影響을 判斷하여야 한다.

4) 建築物의 暖房性

凍土의 융해를 이르킬 熱源과의 接觸與否는 기초공의 選擇에 重要한 要素이다.

5) 建築物의 美觀上 要件

建築物의 美觀上 制約條件에 따라 Thermosyphon 의 Radiator 또는 強制換氣 Duct 의 Intake 또는 Exhaust stack 등의 設置可能性 및 位置가 決定된다.

6) 沈下에 대한 許容度

시설물의 用途上 어느 程度의 沈下를 許容할 수 있느냐가 制限되고 그에 따라 基礎工의 選擇도 決定된다.

7) 地盤의 穿孔性

Pile 시공에 있어서 地盤이 쉽게 穿孔(Pre-drilling) 할 수 있는지 與否에 따라 Pile 기초의 工法이 決定된다.

8) 바닥 龜裂의 許容度

창고, 工場 건물 등은 바닥 龜裂에 對하여 住居, 商店, 學校, 事務室, 慰樂시설 등에 比하여 더 許容할 수 있으며 이에 따라 기초공의 選擇에 기준이 된다.

9) 動力의 供給可能性

動力의 可用性 與否는 機械的 凍結工法이나 強制換氣式 바닥기초 등의 採擇可能性과 直結된다.

10) 維持補修의 必要性

維持補修의 要求頻度와 發注者의 豫算 및 補修에 對한 許容基準 등

11) 건물 使用者(賃貸與否)

건물을 건축주가 사용하느냐 賃入者에게 賃貸하느냐 與否는 건물에 發生하는 小規模 缺陷의 許容도와 直結되고 따라서 基礎工 選擇에도 考慮되어야 한다.

12) 周邊의 出入, 通行要件

車輛이 直接 出入하는 시설 등은 自動車 Ramp, 大型 出入門 등으로 因하여 Thermosy-

phon 의 Radiator, Air Vent Manifold 등의 설치에 制限要素가 되므로 건물 周邊의 接近可能性은 기초공의 선택을 결정하게 된다.

3.2 基礎工 選擇의 決定

앞의 3.1項에 列擧한 諸要件을 基準으로 最適의 基礎工의 選擇에 이르는 Decision Matrix 를 그림 29에 例示한다. 本 Matrix 의 使用은 地盤이 永結된 永久凍土이며 安定된 熱的平衡을 유지하고 있는 平坦한 地域이고 工事は 冬季에 施行한다는 것을 前提條件으로 한다.

基礎工法은 다음의 6가지中 擇一하는 것으로 되어 있다.

- 1) 機械的 凍結바닥 도는 高架構造의 地上隔離 (Crawl Space)
- 2) Thermosyphon
- 3) 強制換氣式 바닥기초(Ventilated Fill Pad)
- 4) 말둑기초
- 5) 기둥 및 Footing(Post-and-Pad)
- 6) 斷熱工을 한 砂礫바닥기초

最適基礎工法을 所期의 目的을 達成하는 가장 低廉한 工法이라 定義할 때 上記 工法의 經濟性은 위에 列擧한 逆順으로 經濟性이 좋다고 보았다.

4. 맺는말

意慾적으로 北方進出을 指向하고 있는 時點에서 우리에게 生疎한 分野인 極寒地에 對한 各方面의 穿鑿과 對備가 切實히 要請되는 此際에 極寒地 基礎工의 現況(State of Practice)을 一覽하고 그 選擇에 관한 資料들을 概觀하였다. 이들 基礎工은 凍土의 特殊한 土質工學의 特性의 研究의 結果로 案出되어 實用化되고 있는 것이므로 이 方面의 基礎的 研究가 더욱 活潑히 展開되기를 바라는 바이다. 近間 學界, 產業界, 研究機關 등에서 斯界에 가장 先進된 소련의 凍土研究機關

과 빈번한 交流가 이루어지고 있어 그 方面의 앞으로의 成果를 期待하여마지 않는 바이다.

參考文獻

1. Theodore A. Hammer 外 "Ground Temperature Observation" TCCRE, ASCE(1985)
 2. N.A. Tsytoich "The Mechanics of Frozen Ground" McGraw-Hill(1975).
 3. C.E. Heuer 外 "Passive Techniques for Ground Temperature Control" TCCRE, ASCE(1985)
 4. John E. Cronin 外 "A Selfrefrigerated Gravel Pad Foundation for Large Thermal Loads" TCCRE, ASCE(1986)
 5. 洪性完 "永久凍土와 土質工學의 問題點" 大韓土質工學會(1989).
 6. Alfred R.Mangus "35-Yea-Old Foundations, Thulu Air Base, Gréenland" TCCRE, ASCE (1986).
 7. Goncharov Y. Mikhailovich "Surface Spatial Ventilated Foundations for Construction on Permafrost" 한국건설기술연구원(1990)
 8. Arvind Phukan 外 "Embankment Design and Construction in Cold Regions" TCCRE, ASCE (1988)
 9. 余俊秀 "극한지에서의 플랜트 건설을 위한 모듈공법" 한국건설기술연구원(1990)
 10. Dennis Nottingham 外 "Pile Construction Practices in Arctic Regions, State of the Art" TCCRE, ASCE(1983)
 11. Howard Thomas 外 "Lpecial Pile Foundations for a Coastal Permafrost Site" tCCRE, ASCE (1986).
 12. John F. Nixon "Active Freezing Techniques" TCCRE, ASCE(1985)
 13. David C. Esch "Thawing Techniques for Frozen Ground" TCCRE, ASCE(1985)
 14. Craig C. Lavielle 外 "Arctic Foundation Selection: Decision Matrix" TCCRE, ASCE(1985)
- 註 : TCCRE : Technical Council on Cold Regions Engineering
ASCE : American Society of Civil Engineers

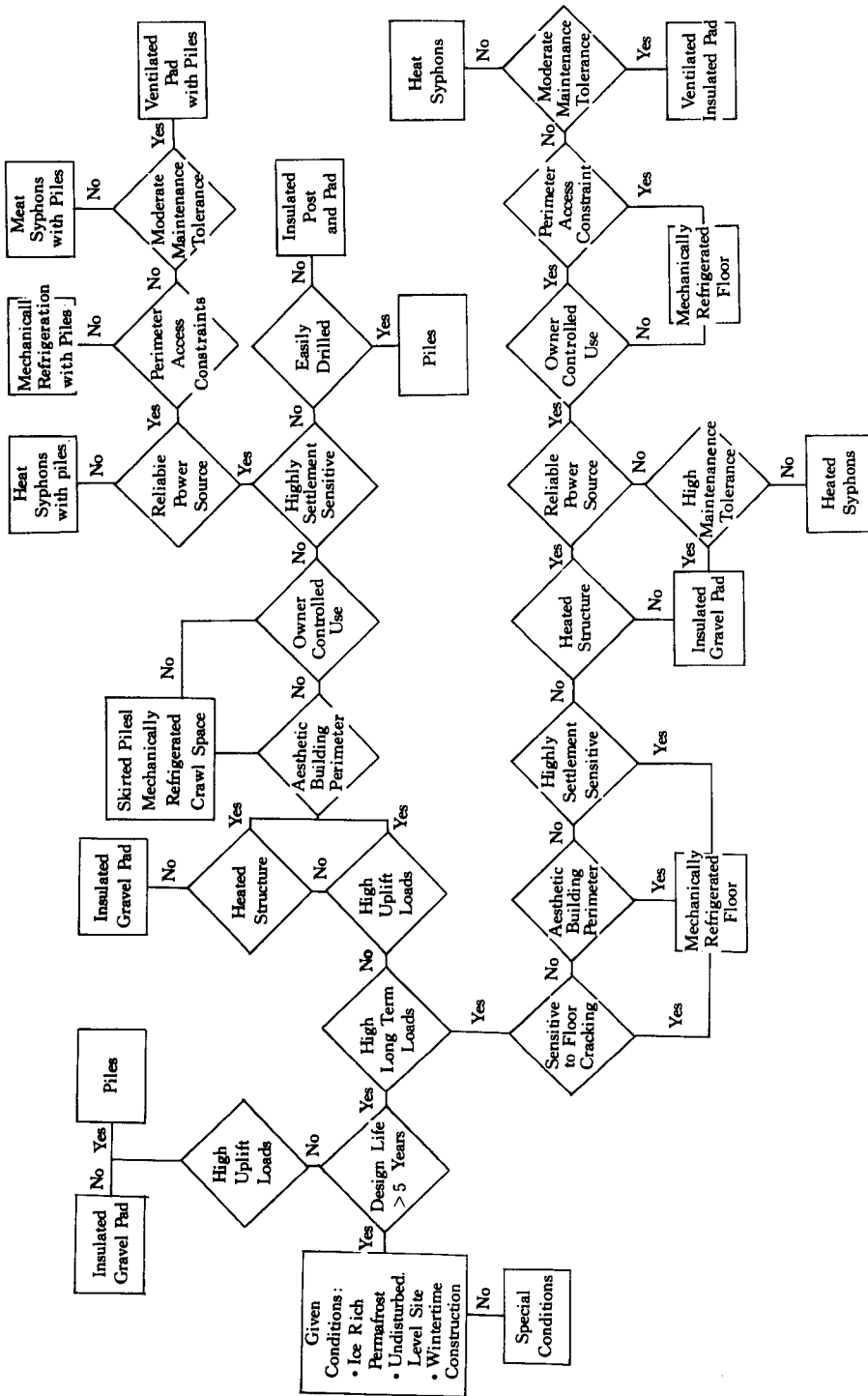


그림 29. 極寒地 基礎工 選擇의 Decision Matrix[14]